بررسی تجربی و عددی نمونهٔ بتنی مسلح با ورق مشبک تحت بارگذاری ضربه*

مقاله پژوهشی

حسین سپهوند(۱)   مجتبی حسینی(۲)   حسین حاتمی(۳)

چکیده *این مطالعه برای ٤نمونهٔ بتنی از بتن خودتراکم استفاده شده است. در روش تجربی شتاب ضربه‌زننده با سنسور شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده و تغییر شکل نمونه‌ها پس از پایان آزمایش اندازه‌گیری شده است. برای آزمایش تجربی از دستگاه تست ضربه سقوط آزاد استفاده شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. این نرم‌افزار در شبیه‌سازی بارگذاری‌های دینامیکی نتایج مقبولی ارائه می‌کند. آزمایش ضربه برای نمونه‌های بدون ورق در شرایط تکیه‌گاهی ۲سرگیردار و ٤طرف آزاد، و برای نمونه‌های مسلح‌شده به‌دلیل کم‌بودن ضخامت نمونه‌ها فقط به‌صورت ٤طرف آزاد انجام شده است. مقایسهٔ نتایج روش تجربی و عددی نشان می‌دهد که این ۲روش تحقیق نتایجی نزدیک به‌هم دارند. نتایج نیز نشان می‌دهد که مقدار جابه‌جایی در نمونه‌های بدون ورق بیشتر از نمونه‌های مسلح‌شده بود. همچنین رفتار ورق‌های مشبک داخل نمونه‌ها بررسی شد.*

واژه‌های کلیدی بتن خودتراکم، تغییر شکل، ساندویچ پانل، ورق مشبک فولادی، ضربه.

مقدمه

امروزه در پی گسترش صنعت ساخت‌وساز در کشور و به‌دنبال زیان‌های جانی و مالی گسترده که در اثر حوادث طبیعی همچون زلزله هرازگاهی از گوشه‌وکنار این سرزمین به گوش می‌رسد، افزایش دقت و ایمنی در تولید و سپس اجرای سازه‌های مهندسی امری ضروری است [۱]. بتن ازجمله پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا شناخته می‌شود؛ با گسترش استفاده از بتن، ویژگی‌هایی همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. بتن خودتراکم SCC بتنی بسیار سیال و روان و مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی مانند جداشدگی، آب‌انداختن، جذب آب، نفوذپذیری و... را رفع کرده است و علاوه بر آن بدون نیاز به لرزاننده (ویبره) داخلی یا ویبره بدنه قالب، تحت اثر وزن خودمتراکم می‌شود [2].

مکانیک ضربه یکی از موضوع‌های اصلی و مهم مهندسی مکانیک است که بعد از جنگ جهانی دوم مورد توجه بیشتر محققان قرار گرفت. به تأثیر بارهای دینامیکی گذرا بر سازه‌های بتنی به‌صورت گسترده در کاربردهای عمرانی و نظامی توجه شده است. به‌عنوان مثال پوسته‌های محافظ یک رآکتور هسته‌ای باید توانایی حفاظت از رآکتور در مقابل برخورد یک هواپیما را داشته باشند. نگاهی به تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که از سال ۱۹٤۰ عملکرد سازه‌های خاص و راهبردی در برابر بارهای ضربه‌ای و انفجاری و بهبود خواص آن‌ها مورد توجه محققان بوده است. بعد از حادثه ۱۱سپتامبر، نه‌تنها طراحان سازه‌های دفاعی و راهبردی، بلکه همهٔ طراحان سازه‌ای به مقاومت ساختمان‌ها در برابر بارهای ضربه‌ای و انفجاری توجه کردند. آزمون ضربه یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین انرژی شکست مواد در اثر تنش دینامیکی است. اساس آزمون ضربه تعیین مقدار انرژی

---

* تاریخ دریافت مقاله۹۸/۱۲/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۷/۱۷ می‌باشد.

DOI: 10.22067/fum-mech.v31i2.86056

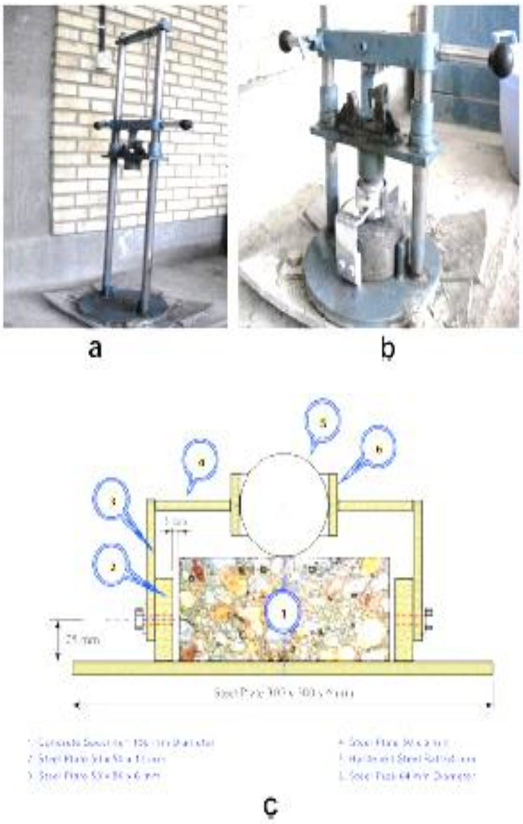
(۱) کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.
(۲) دانشیار، گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.
(۳) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مکانیک، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران.

Email: hatami.h@lu.ac.ir

لازم برای شکستن قطعه در اثر ضربه است. اطلاعاتی که از این آزمون به‌دست می‌آید، در درک چگونگی رفتار ماده در موقعیت‌های کاربردی واقعی بسیار مفید است. هدف آزمون ضربه شبیه‌سازی شرایط واقعی به‌منظور تلاش برای جلوگیری از شکست و پیش‌بینی شکست نمونه است. پدیدهٔ ضربه یک رخداد به‌شدت دینامیکی است، به‌نحوی که در بسیاری از مودهای ارتعاشی در داخل جسم ضربه‌خورنده تحریک می‌شوند. بااین‌حال، در هنگام تحلیل دینامیکی ضربه با سرعت کم، می‌توان از قوانین تماسی که به‌صورت استاتیکی به‌دست آمده‌اند، استفاده کرد؛ زیرا در سرعت‌های کم، اثرات نرخ کرنش و انتشار امواج برای بسیاری از مواد متداول ناچیز است[۳].

زیتکویچ [4] روشی برای بهبود رفتار بتن مسلح یافت. او از الیاف سیم آهنی تقریبا به‌طول ۱۰۰میلی‌متر و قطر ۱۰میلی‌متر، که به الیاف فولادی استفاده‌شده در بتن امروزی بسیار شبیه بود، استفاده کرد و نتیجه کار این بود که مقاومت‌های فشاری، کششی و برشی افزایش می‌یابد. تسو–لیانگ‌تنگ و همکارانش [5] ۳ نوع بتن مسلح‌شده با الیاف فولادی را با مقاومتی در حدود ۳۰مگاپاسکال به‌روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تحت برخورد پرتابه با سرعت زیاد بررسی کردند. در شکل (۱) نمایی از دستگاه سقوط چکش و شماتیک تست ضربه دیده می‌شود.

ژنگا و همکاران [6] در تحقیقات خود بر روی میزان عمق نفوذ پرتابه‌ها بر روی بتن با مقاومت بالا، به این نتیجه رسیدند که با افزایش مقاومت بتن، عمق نفوذ پرتابه کمتر می‌شود. سونگ و همکاران [7] در سال ۲۰۰۵ آزمایش‌هایی را با اضافه‌کردن الیاف فولادی به بتن با مقاومت بالا انجام دادند. بتن مسلح‌شده الیاف فولادی در قالب‌های استوانه‌ای ۳۰۰×۱۵۰میلی‌متری ریخته شد. آزمایش‌های مقاومت ضربه‌ای روی نمونه‌های ساخته‌شده انجام شد و مهم‌ترین نتیجهٔ کار آن‌ها این بود که مقاومت ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا حاوی الیاف فولادی به مقدار چشمگیری در مقایسه با بتن با مقاومت بالا (بدون الیاف) بهبود می‌یابد.



شکل ۱ (a) دستگاه سقوط چکش (b) تنظیم نمونه (c) تست ضربه و ابزار و ابعاد [5]

کلانتری و همکاران [8] در سال ۲۰۰۹ به بهینه‌سازی پانل‌های ساندویچی که هسته بتنی دارند و ۲طرف آن صفحه کامپوزیتی است، براساس سرعت ضربه‌ای کم پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که پانل‌های پشتی باعث می‌شود نیروی مقاومت پانل‌ها در برابر ضربه بیشتر شود. رخشانی مهر و همکاران [۹] تأثیر میزان الیاف فولادی به‌کاررفته در بتن‌های با ردهٔ مقاومتی مختلف را بررسی کردند. شاخص‌های مقاومتی که برای شناسایی رفتار بتن انتخاب می‌شود، شامل مقاومت کششی، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی است. در این پژوهش نمونه‌ها همچنین در هر

رده مقاومتی با ٤مقدار بدون الیاف، ۱۵، ۲۵ و ۳۵کیلوگرم الیاف در مترمکعب ساخته شدند. نتایج ایشان حاکی از آن بود که استفاده از الیاف فولادی مقاومت ضربه‌ای، زمان ظهور اولین ترک و مقاومت نهایی بتن را به‌طور درخور ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. همچنین افزودن این نوع الیاف مقاومت کششی و خمشی را به‌خوبی افزایش می‌دهد، اما تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. سزاری و همکاران [۱۰] به بررسی رفتار یک نوع بتن فوق‌توانمند مسلح‌شده با الیاف فولادی (UHPSFRC) در مقابل برخورد پرتابه‌های با سرعت کم و زیاد پرداختند. برای بررسی رفتار و قابلیت این بتن در تحمل ضربه و برخورد پرتابه‌ها در این تحقیق، نوعی بتن با مقاومت بالا (HSC) نیز به‌عنوان مبنای مقایسه ساخته شده است. رفتار این ۲نوع بتن در مقابل ضربه با سرعت کم با انجام آزمایش سقوط وزنه بررسی شده است و خصوصیاتی شامل تعداد ضربه‌های لازم برای ایجاد اولین ترک و گسیختگی کلی، الگوی ترک‌خوردگی و قطر سوراخ‌شدگی در نمونه‌های بتنی مدنظر قرار گرفته است. برای بررسی این ۲نوع بتن در مقابل برخورد پرتابه با سرعت زیاد، از روش شبیه‌سازی عددی استفاده شده است. نتایج آزمایش سقوط چکش نشان می‌دهد که HSC ترد است و مقاومت ضربه‌ای کمتری دارد و در همان ضربه اول به چندین تکه شکسته می‌شود، اما UHPSFRC با ۲ درصد الیاف رفتاری شکل‌پذیر بروز می‌دهد و قادر به تحمل دست‌کم ۱۰ضربهٔ پی‌درپی چکش است. نتایج شبیه‌سازی عددی نیز نشان می‌دهد که در شرایط یکسان برخورد پرتابه اجایو شکل با سرعت زیاد، به هدف بتنی UHPSFRC بدون سوراخ‌شدگی نفوذ می‌کند، اما در هدف HSC با همان ضخامت نفوذ کامل و سوراخ‌شدگی اتفاق افتاده است. خداداد واحدی و همکارانش [۱۱] با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA رفتار دینامیکی هدفی بتنی در مقابل نفوذ پرتابهٔ شبیه‌سازی‌شده را بررسی کردند و برای این منظور، برخورد پرتابهٔ فولادی به هدف بتنی مدنظر مدل‌سازی شد و ضمن محاسبهٔ عمق نفوذ پرتابه در هدف، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی مقایسه شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده تطابقی مناسب بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی است.

آزمایش

نمونه‌های آزمایش

برای انجام آزمایش ضربه از ۲نمونه بتنی بدون ورق با ابعاد ۱۰×۱۵×۱۵سانتی‌متر و ۲نمونه مسلح‌شده با ابعاد ۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌ها از بتن خودتراکم توانمند استفاده شده است. مقدار بتن لازم برای ساخت نمونه‌ها مطابق رابطهٔ (۱) است که در این رابطه W_c وزن بتن مورد نیاز برحسب کیلوگرم، a_c طول نمونه برحسب متر، b_c عرض نمونه برحسب متر، h_c ضخامت نمونه برحسب متر، ρ_c وزن مخصوص بتن که مقدار آن ۲٤۰۰کیلوگرم بر مترمکعب است و n_c هم تعداد نمونه‌های بتنی است.

$$Wc = ac \times bc \times hc \times \rho c \times nc \qquad (۱)$$

ساخت نمونه‌های مسلح‌شده به این صورت بود که در حین ساخت از ۲ورق در بالا و پایین نمونه استفاده شده است، همچنین برای بررسی تأثیر ضخامت ورق، یک نمونه با ورق ضخامت ۰/۸میلی‌متر و نمونهٔ دیگر با ورق ضخامت ۱میلی‌متر ساخته شد. برای هم‌بستگی و گیرایی بهتر بتن و ورق به‌ازای هر کیلوگرم سیمان، ٤گرم فوق‌روان‌کننده Dezobuild D-10 استفاده شده است. نمونه‌ها بعد از ساخت برای عمل‌آوری به‌مدت ۲۸ روز در آب قرار داده شدند. در شکل (۲) مراحل ساخت و بتن‌ریزی و عمل‌آوری بتن مشاهده می‌شود.



(ب) بتن‌ریزی قالب‌ها



(الف) قالب قبل از بتن‌ریزی



(د) عمل‌آوری نمونه‌ها در آب به‌مدت ۲۸روز

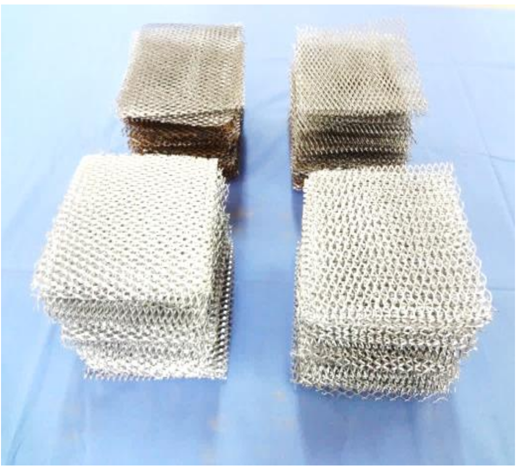


(ج) درآوردن نمونه‌ها از قالب

شکل ۲ مراحل ساخت ، بتن‌ریزی و عمل‌آوری نمونه‌ها

ورق

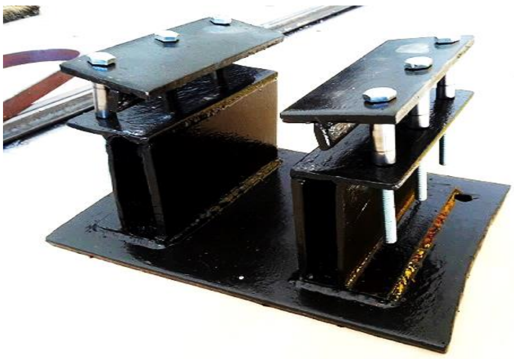
ورق استفاده‌شده در ساخت نمونه‌ها از توری‌های مشبک لوزی با ضخامت ۰/۸ و ۱میلی‌متر با نام تجاری اکسپند مش و از جنس فولاد st37 است. اندازه ورق‌ها برای ساخت ۲نمونه مسلح‌شده ۱٤×۱٤سانتی‌متر است. ۲دلیل برای این کاهش اندازه ورق‌ها وجود داشت؛ دلیل اول جاگیری بهتر ورق‌ها در داخل قالب‌ها در هنگام بتن‌ریزی و دلیل دوم اینکه در ٤ طرف ۲ نمونه یک کاور بتنی برای ورق‌ها وجود داشته باشد. در شکل (۳) نمایی از ورق‌های به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها قابل مشاهده است.



شکل ۳ نمایی از ورق‌های به‌کاررفته در ساخت نمونه‌ها

فیکسچر

فیکسچر وسیله‌ای است که باید قطعهٔ کار را در موقعیت مناسب جای دهد و آن را هنگام انجام عملیات ساخت در وضعیت مطلوب نگه دارد. برای شرایط ۲ سرگیرداربودن نمونه‌ها در حین ضربه از ۲تیرآهن IPE نمره ۱٤ به‌طول ۲۰سانتی‌متر استفاده شده است که تیرآهن‌های یادشده با فاصله ۱۱سانتی‌متر از یکدیگر در راستای موازی روی یک ورق فولادی به ابعاد ۳۰×۲۵سانتی‌متر و ضخامت ۱سانتی‌متر به‌صورت دقیق جوشکاری شده است. برای تقویت بال‌های ۲تیرآهن، در جان تیرآهن‌ها ورقی با ضخامت ۱سانتی‌متر با ابعاد ۲۰×۱۳سانتی‌متر جوشکاری و اجرا شده است. در ادامه کار برای مهار نمونه‌ها در بالای فیکسچر از ۲ورق به ابعاد ۲۰×۷سانتی‌متر و ضخامت ۱سانتی‌متر استفاده شد. ابعاد ورق‌ها برابر با ابعاد بال ۲تیرآهن IPE نمره۱٤ جوشکاری‌شده است. ورق‌های بالایی با ٦پیچ نمره۱۰ به بال‌های ۲تیرآهن متصل می‌شود و نمونهٔ بتنی را در هنگام ضربه کاملا ثابت نگه می‌دارد. برای جلوگیری از کمانش ورق‌های بالایی از ۲ورق به ابعاد ۲۰×۲سانتی‌متر استفاده کرده‌ایم که به‌صورت قائم جوشکاری شده است. در شکل (٤) نمای فیکسچر استفاده‌شده در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل ٤ نمای فیکسچر

دستگاه آزمایش تست ضربه و شتاب‌سنج

دستگاه استفاده‌شده برای آزمایش ضربه مدل DH-TM-(7500J است. نهایت ارتفاع تنظیم‌پذیر این دستگاه ۳ متر است و جرم ضربه‌زننده از ۱۸۰ تا ۲۵۰کیلوگرم تنظیم‌شدنی است. ارتفاع سقوط در این پژوهش ۲۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. جرم ضربه‌زننده به ٤نمونهٔ بتنی در این تحقیق۱۸۰کیلوگرم انتخاب شده است. این دستگاه ۳ مدل سر ضربه‌زننده در اشکال تخت، مخروطی و نیم‌کروی دارد. دراین‌بین، سطح تماس پرتابهٔ تخت با هدف بتنی بیشتر از نیم‌کروی و برای نیم‌کروی بیشتر از مخروطی است. در این تحقیق برای مقایسهٔ نتایج تغییر شکل نمونه‌ها حین ضربه، سر ضربه‌زننده با شکل نیم‌کروی و به‌قطر ۱۲سانتی‌متر استفاده شده است. در شکل (۵) نمایی از سر ضربه‌زننده نیم‌کروی قابل مشاهده است. در جدول (۱) خواص مکانیکی سر ضربه‌زننده بیان شده است.



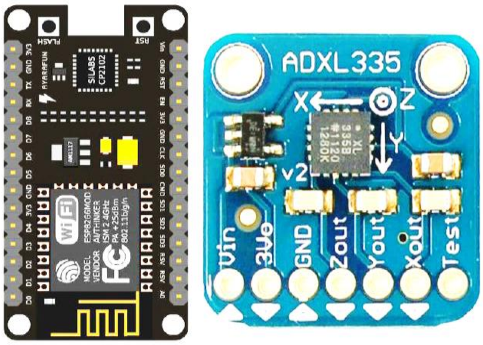
شکل ۵ سر ضربه‌زنندهٔ نیم‌کروی

جدول ۱ مشخصات مکانیکی سر ضربه‌زننده

جرم حجمی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
۹۹٤۵	۲۳۰	۰/۳

دستگاه تست ضربه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که عبارت‌اند از: قسمت کنترل مرکزی دستگاه، سیستم اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات (شتاب‌سنج با دقت اندازه‌گیری میکروثانیه و به‌صورت وای‌فای استفاده شده است)، موتور، پایه‌های نگهدارنده

ضربه‌زننده، وزنه‌های ضربه‌زننده (۱۸۰-۲۵۰کیلوگرم) و سر ضربه‌زننده در اشکال مختلف (تخت، مخروطی، نیم‌کروی). این دستگاه ساخت ایران و مربوط به دانشگاه لرستان است. در شکل (٦) نمایی از این دستگاه و سنسور شتاب‌سنج آن نشان داده شده است.



(الف)

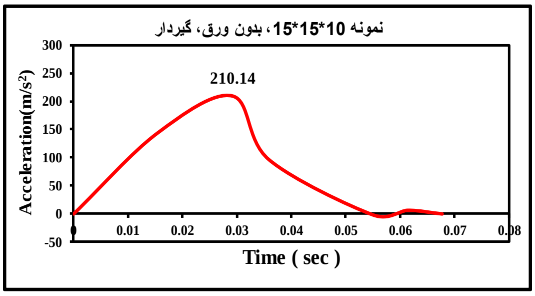


(ب)

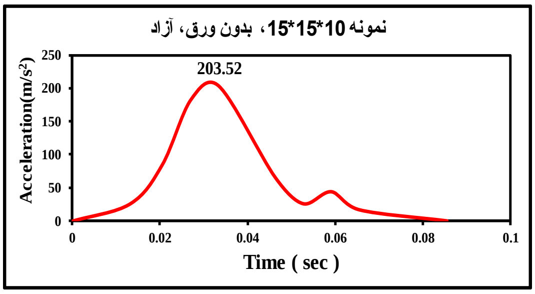
شکل ٦ (الف) سنسور شتاب‌سنج، (ب) دستگاه تست ضربه

نتایج آزمایش تجربی

نتایج این تحلیل به‌صورت نمودارهای شتاب-زمان از دستگاه شتاب‌سنج است. شکل (٧) نمودارهای شتاب-زمان نمونه‌های بدون ورق با شرایط تکیه‌گاهی ٤طرف آزاد و ٢طرف گیردار و شکل (٨) نمودارهای شتاب-زمان ٢نمونه مسلح‌شده است.

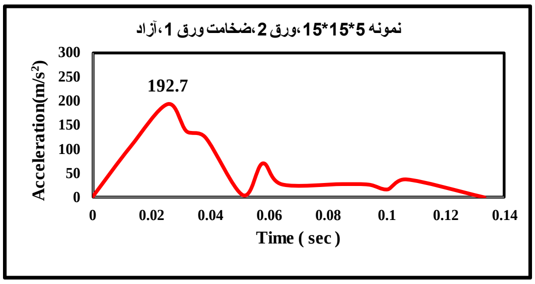


(الف)

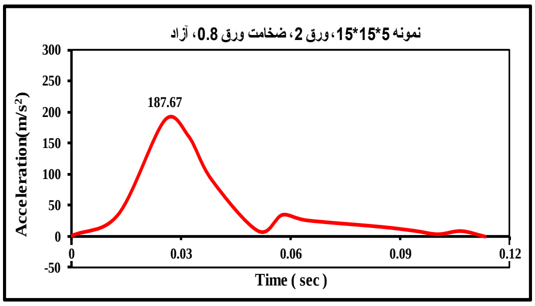


(ب)

شکل ٧ (الف) نمودار شتاب-زمان، بدون ورق، ٢طرف گیردار، تست تجربی، (ب) نمودار شتاب-زمان، بدون ورق، ٤طرف آزاد، تست تجربی



(الف)



(ب)

شکل ٨ (الف) نمودار شتاب-زمان، ٢ ورق ضخامت ١میلی‌متر، تست تجربی، (ب) نمودار شتاب-زمان، ٢ ورق ضخامت ٠/٨میلی‌متر، تست تجربی

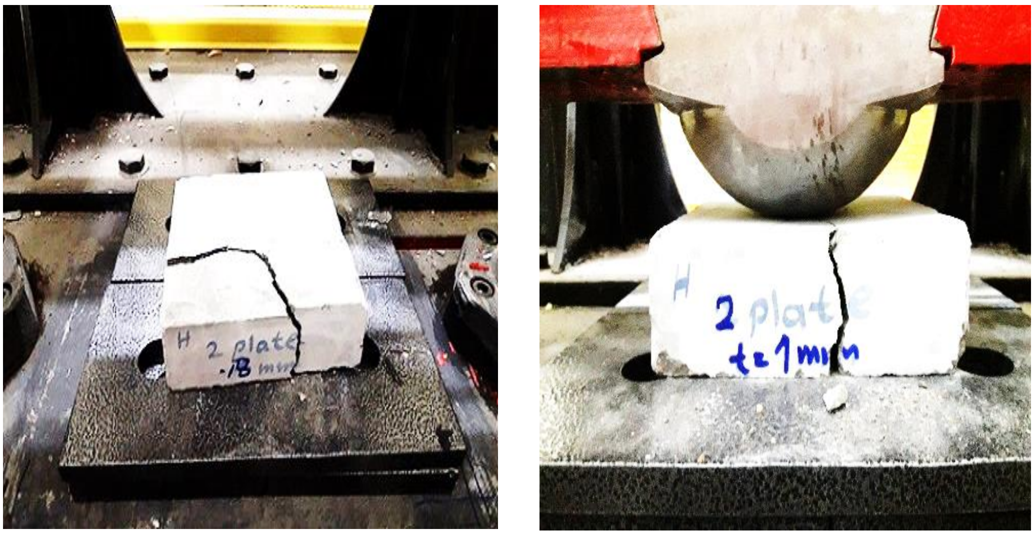
مقدار جابه‌جایی در روش تجربی برای نمونه‌های بدون ورق به‌دلیل تخریب کامل ۲نمونه همان ضخامت ۰/۱متر نمونه‌ها ست، اما برای محا سبهٔ مقدار جابه‌جایی در ۲نمونهٔ مسلح‌شده بعد از انجام آزمایش ضربه از کولیس ا ستفاده شده ا ست. شکل (۹) و شکل (۱۰) تغییر شکل و میزان جابه‌جایی نمونه‌ها را بعد از ضربه نشان می‌دهد.

مقدار نیرو برای هر ٤نمونه مطابق قانون دوم نیوتن از ضرب مقدار شتاب نمونه‌ها در جرم گوی ضربه‌زننده که در این تحقیق ۱۸۰کیلوگرم است، محاسبه شده ا ست. در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نمودارهای نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها قابل مشاهده است.



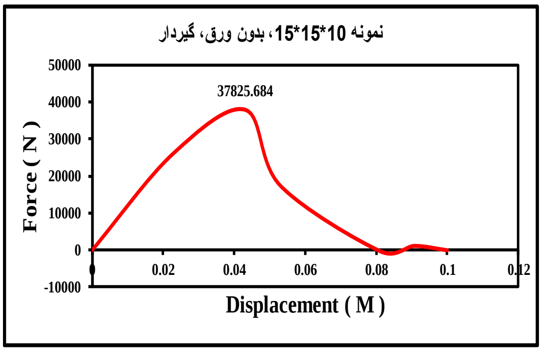
(الف)		(ب)

شکل ۹ (الف) نمونهٔ بدون ورق، ٤ طرف آزاد بعد از ضربه، (ب) نمونهٔ بدون ورق، ۲طرف گیردار بعد از ضربه

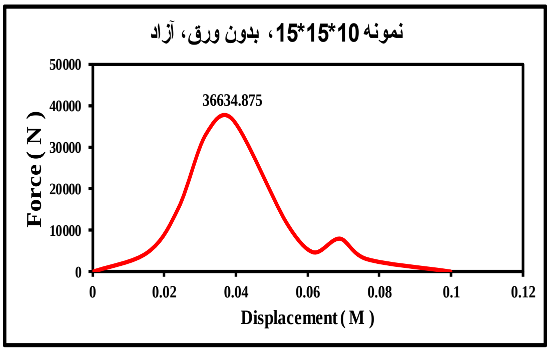


(الف)		(ب)

شکل ۱۰ (الف) نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۱میلی‌متر بعد از ضربه، (ب) نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۰/۸میلی‌متر بعد از ضربه

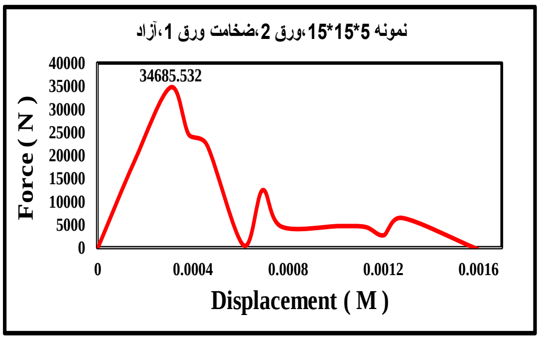


(الف)

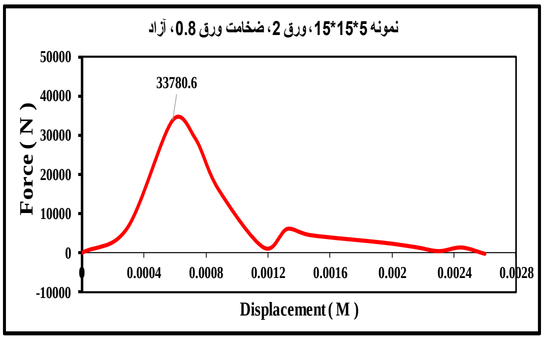


(ب)

شکل ۱۱ (الف) نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونهٔ بدون ورق ۲طرف گیردار، (ب) نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونهٔ بدون ورق ٤طرف آزاد



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ (الف) نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونهٔ ۲ورق ضخامت ۱میلی‌متر، (ب) نمودار نیرو–جابه‌جایی نمونهٔ ۲ورق ضخامت ۰/۸میلی‌متر

جدول ۲ نتایج تست تجربی

ابعاد نمونه (cm)	تعداد ورق	ضخامت ورق (mm)	شتاب (m/s^2)	جابه‌جایی (M)	نیرو (N)	تکیه‌گاه	ارتفاع سقوط (cm)
۱۵×۱۵×۱۰	–	–	۲۰۳/۵۲	۰/۱	۳۶۶۳۴/۸۷	آزاد	۲۵
۱۵×۱۵×۱۰	–	–	۲۱۰	۰/۱	۳۷۸۲۵/۶۸	گیردار	۲۵
۱۵×۱۵×۵	۲	۱	۱۹۲/۷	۰/۰۰۱۶	۳۴۶۸۶	آزاد	۲۵
۱۵×۱۵×۵	۲	۰/۸	۱۸۷/۶۷	۰/۰۰۲۶	۳۳۷۸۰/۶	آزاد	۲۵

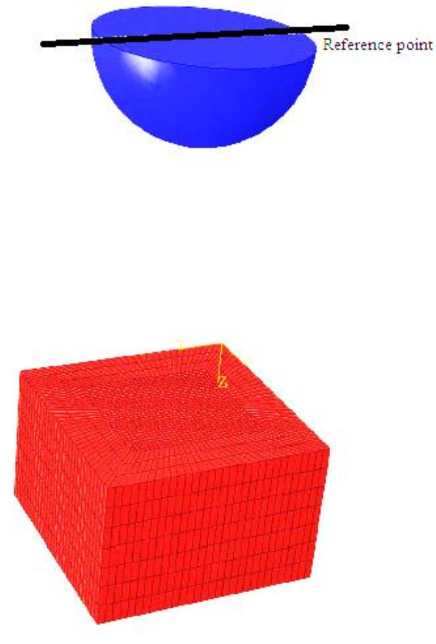
در جدول (۲) ماکزیمم شتاب نمونه‌ها برحسب متر بر مجذور ثانیه، جابه‌جایی برحسب متر و مقدار نیروی نمونه‌ها برحسب نیوتن نمایش داده شده است.

از نتایج تجربی در جدول شماره (۲) مشاهده می‌شود که نمونه‌های بدون ورق نسبت به نمونه‌های مسلح‌شده شتاب بیشتری دارند. همچنین نمونه‌های مسلح‌شده با ورق، نسبت به نمونه‌های بدون ورق جابه‌جایی کمتری دارند که این مو ضوع به‌و ضوح تأثیر وجود ورق در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. از طرفی نمونهٔ مسلح‌شده با ورق ضخامت ۱میلی‌متر به‌واسطهٔ ضخامت بیشتر در مقایسه با نمونهٔ مسلح‌شده با ورق ضخامت ۰/۸میلی‌متر، جابه‌جایی کمتری دارد که این مو ضوع بیانگر آن ا ست که با افزایش ضخامت ورق، جابه‌جایی نمونه بعد از واردشدن ضربه کمتر

می‌شود.

مدل‌سازی عددی

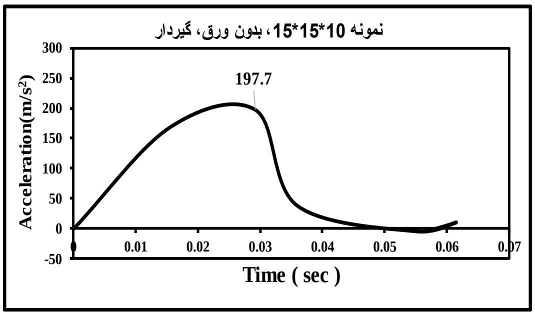
برای بررسی عددی رفتار نمونه‌های بتنی تحت ضربه ناشی از سقوط آزاد و مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی، مدل‌سازی المان محدودی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای هر ٤نمونه انجام شده است. برای مدل سازی بتن خصوصیات بتن خودتراکم و مدل سازی ورق مشبک خصوصیات فولاد st37 لحاظ شده است. با اعمال نقطهٔ مرجع Reference point در گوی ضربه‌زننده که به‌صورت خط مشکی در شکل (۱۳) قابل مشاهده است، نمودارهای شتاب-زمان و نیرو-جابه‌جایی نمونه‌ها استخراج شده است.



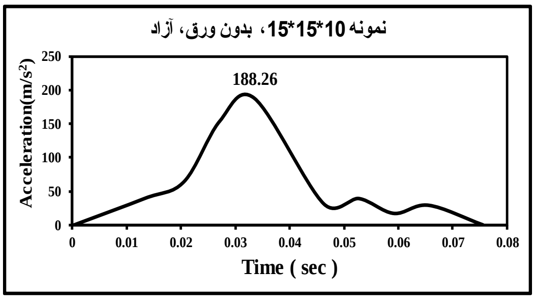
شکل ۱۳ مدل‌سازی گوی و نمونه

نتایج مدل‌سازی عددی

نتایج این تحلیل به‌صورت نمودارهای شتاب-زمان خروجی از نرم‌افزار آباکوس به‌دست آمده که در شکل (١٤) و شکل (١٥) نمودارهای شتاب زمان هر ٤نمونه در روش عددی نمایش داده شده است.

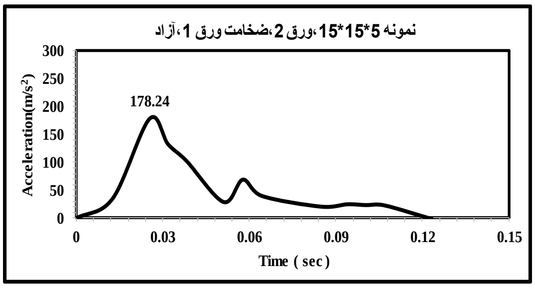


(الف)

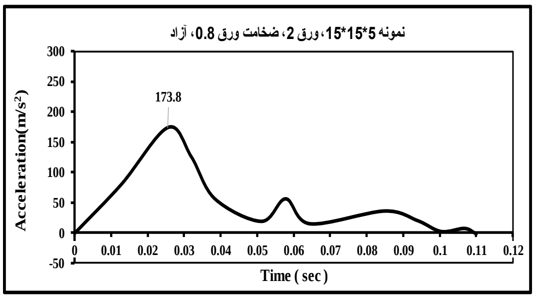


(ب)

شکل ١٤ (الف) نمودار شتاب-زمان، بدون ورق، ۲ طرف گیردار، تست عددی، (ب) نمودار شتاب-زمان، بدون ورق، ٤ طرف آزاد، تست عددی



(الف)

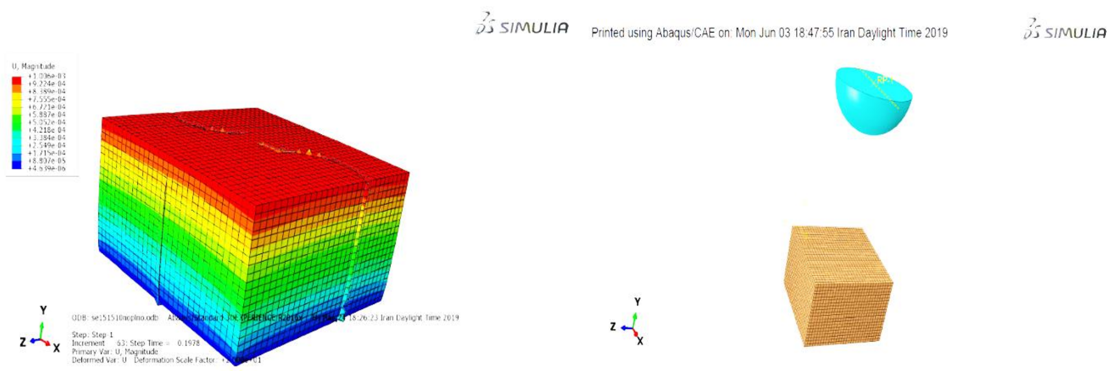


(ب)

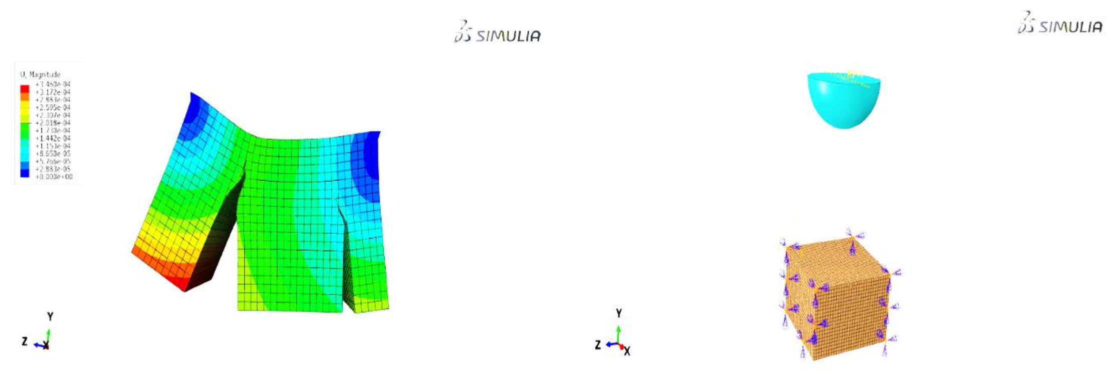
شکل ١٥ (الف) نمودار شتاب-زمان، ۲ورق ضخامت ۱میلی‌متر، تست عددی، (ب) نمودار شتاب-زمان، ۲ورق ضخامت ۰/۸میلی‌متر، تست عددی

از نمودارهای شتاب–زمان در روش عددی مشاهده می‌شود که مانند روش تجربی شتاب نمونه‌های بدون ورق از نمونه‌های مسلح‌شده بیشتر است. همچنین شتاب در نمونهٔ بدون ورق در شرایط تکیه‌گاهی ۲سرگیردار بیشتر از شتاب نمونهٔ بدون ورق در حالت ٤طرف آزاد است. شتاب نمونهٔ مسلح‌شده با ورق ضخامت ۱میلی‌متر از نمونهٔ مسلح‌شده با ورق ۰/۸میلی‌متر بیشتر است و این موضوع بیانگر آن است که ضخامت بیشتر ورق باعث افزایش شتاب می‌شود. شکل (١٦) و شکل (١٧) مدل‌سازی هر ٤نمونه قبل و بعد از ضربه را نشان می‌دهد. از مشاهدهٔ نوع ترک‌های ایجادشده در ۲نمونه می‌توان استنباط کرد که تغییر شکل و میزان جابه‌جایی در نمونه‌های مسلح‌شده کمتر از نمونه‌های بدون ورق است.

نمودارهای نیرو–جابه‌جایی نمونه‌ها که خروجی نرم‌افزار آباکوس است، در شکل (۱۸) و شکل (۱۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار نیروی نمونه‌های بدون ورق از مقدار نیروی نمونه‌های مسلح‌شده بیشتر است. مقادیر جابه‌جایی نمونه‌ها در روش عددی کمتر از مقادیر جابه‌جایی نمونه‌ها در روش تجربی است و این اختلاف ناچیز ناشی از آن است که در روش عددی ارتفاع سقوط دقیق ۲۵سانتی‌متر لحاظ می‌شود و ضربه گوی ضربه‌زننده درست به مرکز نمونه برخورد می‌کند و شاید در روش تجربی این ۲نکته به‌دلیل آزمایشگاهی‌بودن روش به‌صورت دقیق و میلی‌متری رعایت نشود. در جدول (۳) ماکزیمم شتاب نمونه‌ها برحسب متر بر مجذور ثانیه، جابه‌جایی برحسب متر و مقدار نیرو نمونه‌ها برحسب نیوتن در روش عددی نمایش داده شده است.

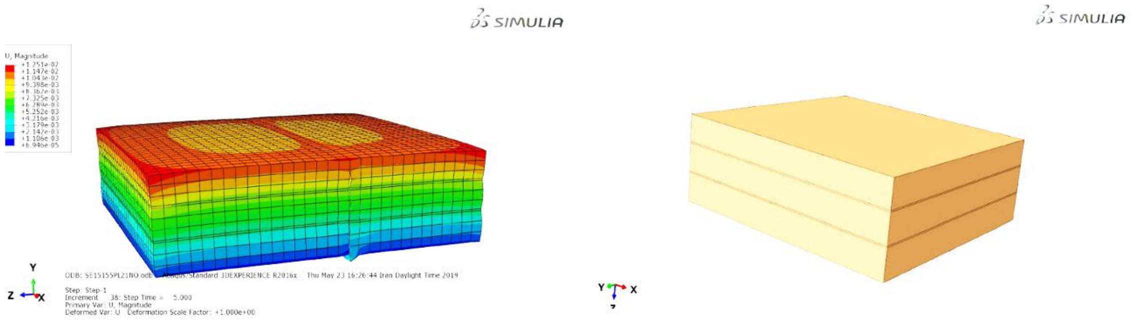


(الف)

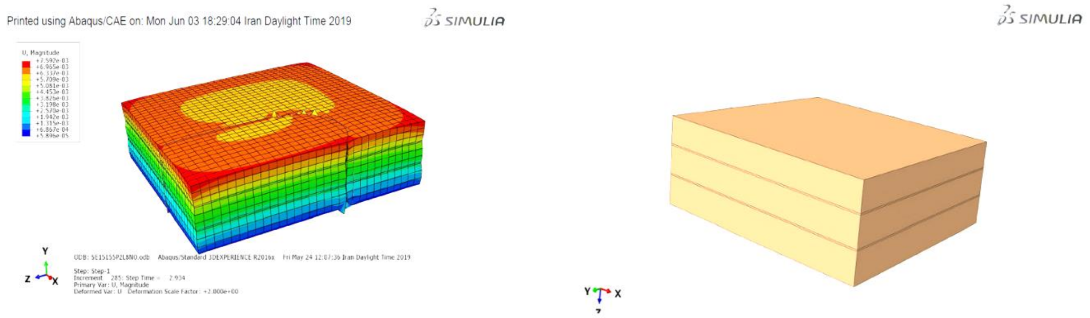


(ب)

شکل ١٦ (الف) مدل‌سازی نمونهٔ بدون ورق، ٤طرف آزاد، (ب) مدل‌سازی نمونهٔ بدون ورق، ۲طرف گیردار، قبل و بعد از ضربه

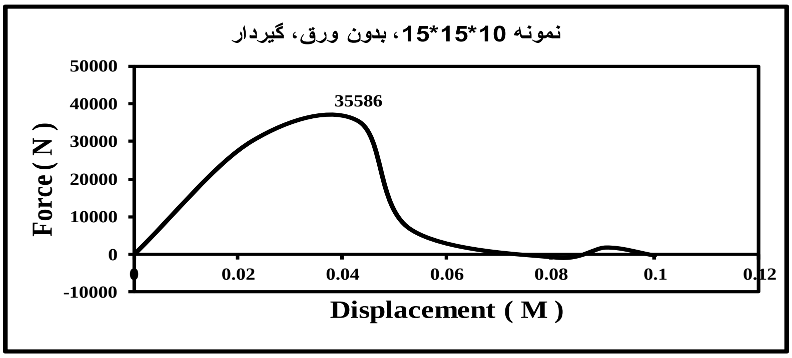


(الف)

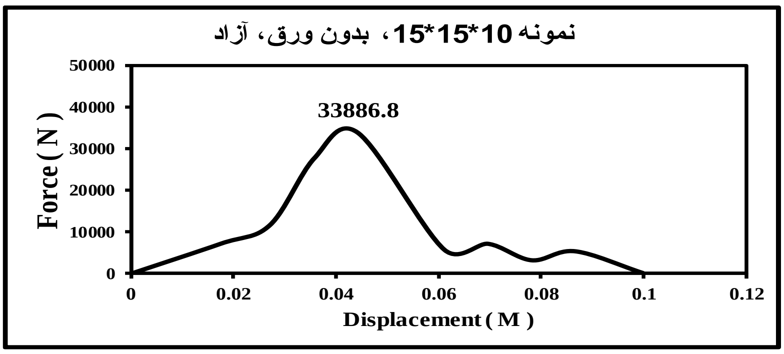


(ب)

شکل ۱۷ (الف) نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۱میلی‌متر ٤طرف آزاد، ۰ب) نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۰/۸میلی‌متر ٤طرف آزاد، قبل و بعد از ضربه،

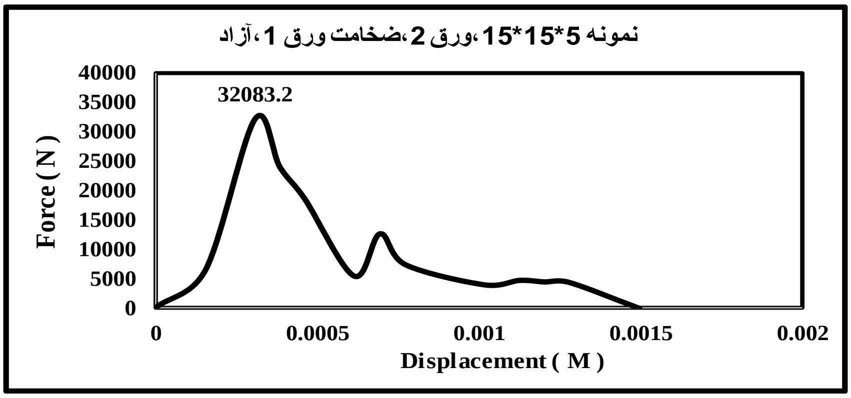


(الف)

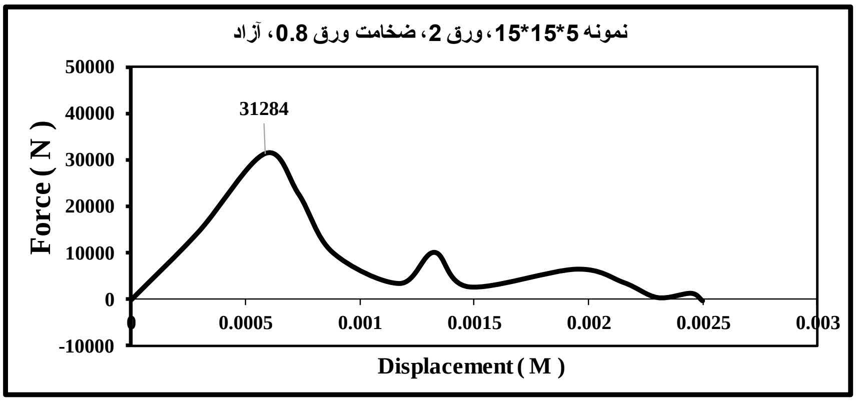


(ب)

شکل ۱۸ (الف) نمودار نیرو-جابه‌جایی، بدون ورق، ۲طرف گیردار، (ب) نمودار نیرو- جابه‌جایی، بدون ورق، ٤طرف آزاد، تست عددی



(الف)



(ب)

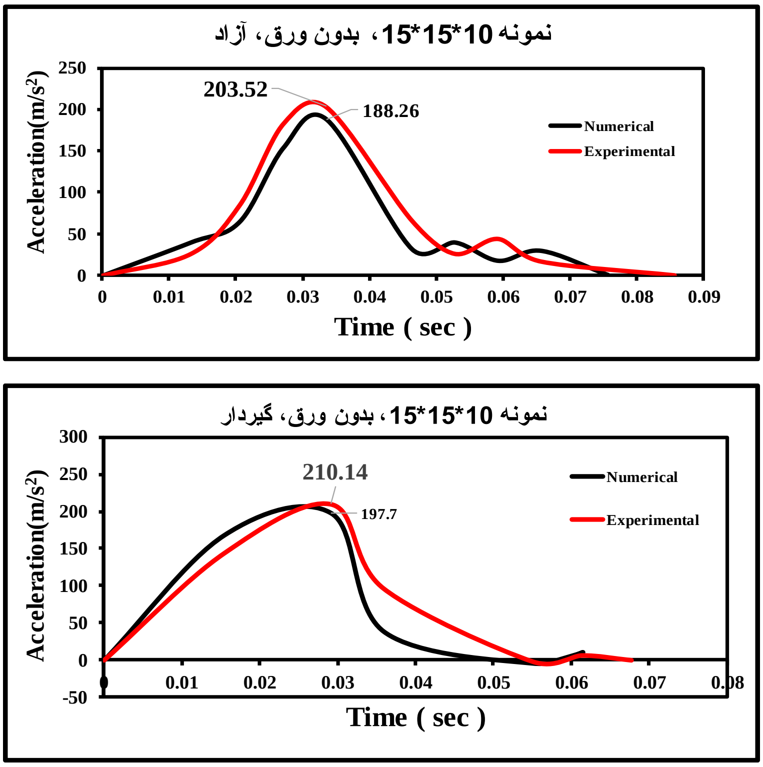
شکل ۱۹ (الف) نمودار نیرو–جابه‌جایی، ۲ورق ضخامت ۱میلی‌متر، (ب) نمودار نیرو–جابه‌جایی، ۲ورق ضخامت ۰/۸میلی‌متر، تست عددی

جدول ۳ نتایج تست عددی

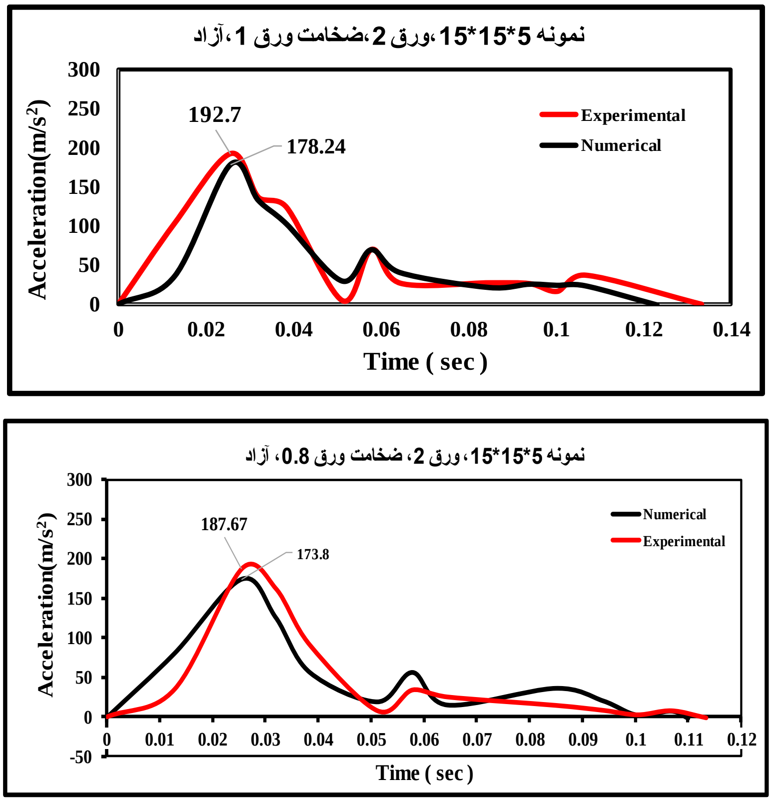
ابعاد نمونه (cm)	تعداد ورق	ضخامت ورق (mm)	شتاب (m/s^2)	جابه‌جایی (M)	نیرو (N)	تکیه‌گاه	ارتفاع سقوط (cm)
۱۵×۱۵×۱۰	–	–	۱۸۸/۲٦	۰/۱	۳۳۸۸٦/۸	آزاد	۲۵
۱۵×۱۵×۱۰	–	–	۱۹۷/۷	۰/۱	۳۵۵۸٦	گیردار	۲۵
۱۵×۱۵×۵	۲	۱	۱۷۸/۲٤	۰/۰۰۱۵	۳۲۰۸۳/۲	آزاد	۲۵
۱۵×۱۵×۵	۲	۰/۸	۱۷۳/۸	۰/۰۰۲۵	۳۱۲۸٤	آزاد	۲۵

بحث و نتایج

در مقایسهٔ نمودارهای شتاب–زمان و نیرو–جابه‌جایی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مقادیر تجربی از مقادیر عددی بیشتر و این اختلاف کمتر از ۷درصد است که این مقدار به‌دلایلی از قبیل اصطکاک بین یاتاقان‌های ضربه‌زننده، میله‌های نگهدارندهٔ وزنه و همچنین وجود میرایی است که در مدل عددی اعمال نشده است. البته باید در نظر داشت که شرایط تکیه‌گاهی و خطای احتمالی در ساخت نمونه‌ها عامل مهمی در مقدار نتایج است. در شکل (۲۰) مقایسهٔ نمودارهای شتاب–زمان و شکل (۲۱) نمودارهای نیرو–جابه‌جایی هر ٤نمونه در روش تجربی و عددی نشان داده شده است.

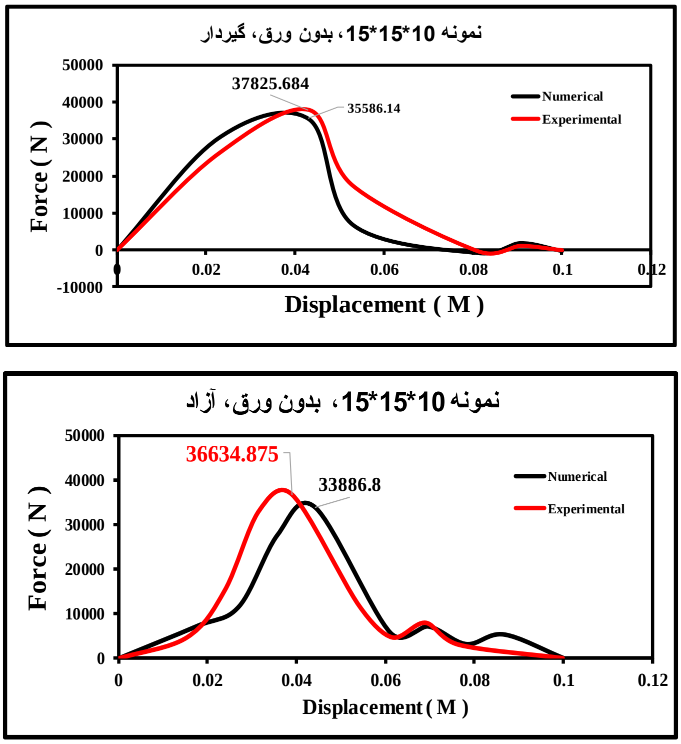


(الف)

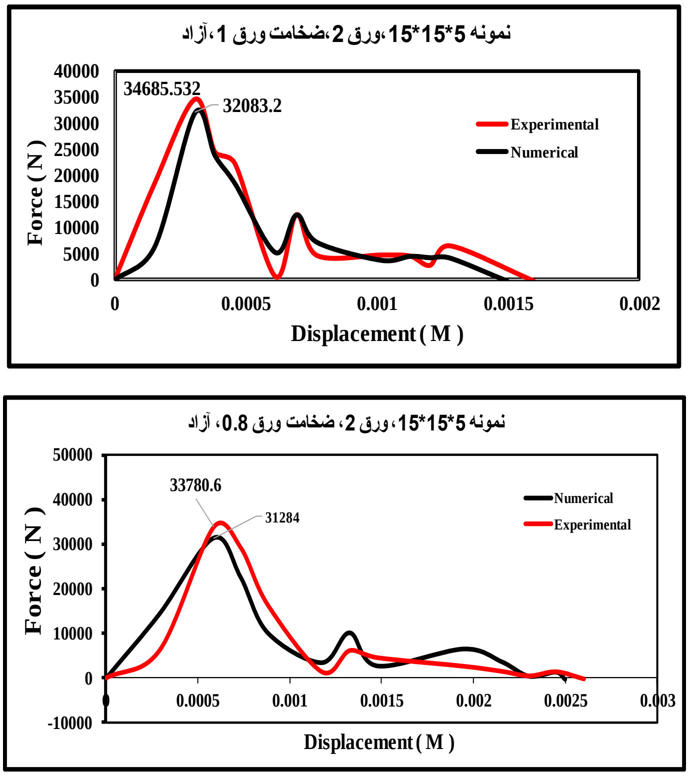


(ب)

شکل ۲۰ (الف) مقایسهٔ نمودار شتاب-زمان نمونه‌های بدون ورق، (ب) مقایسهٔ نمودار شتاب-زمان نمونه‌های مسلح‌شده



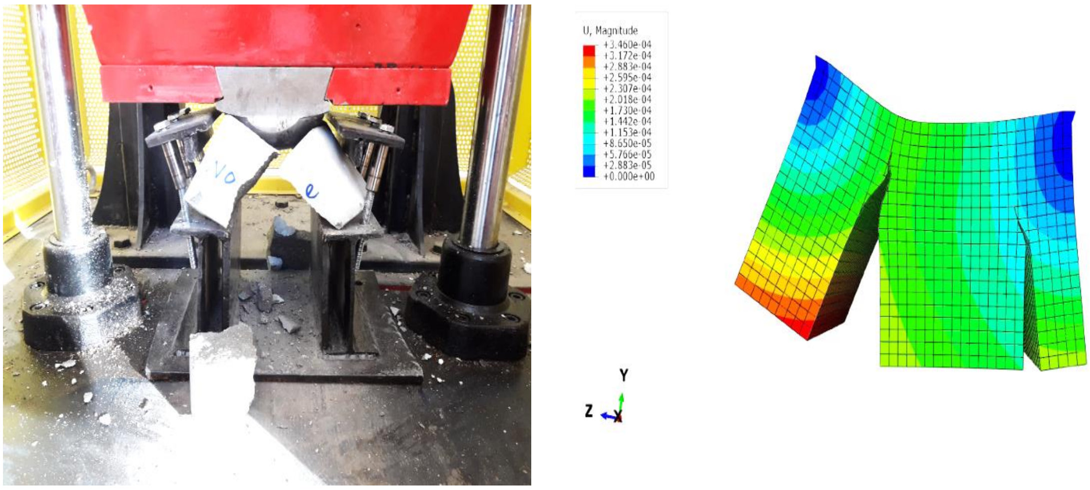
(الف)



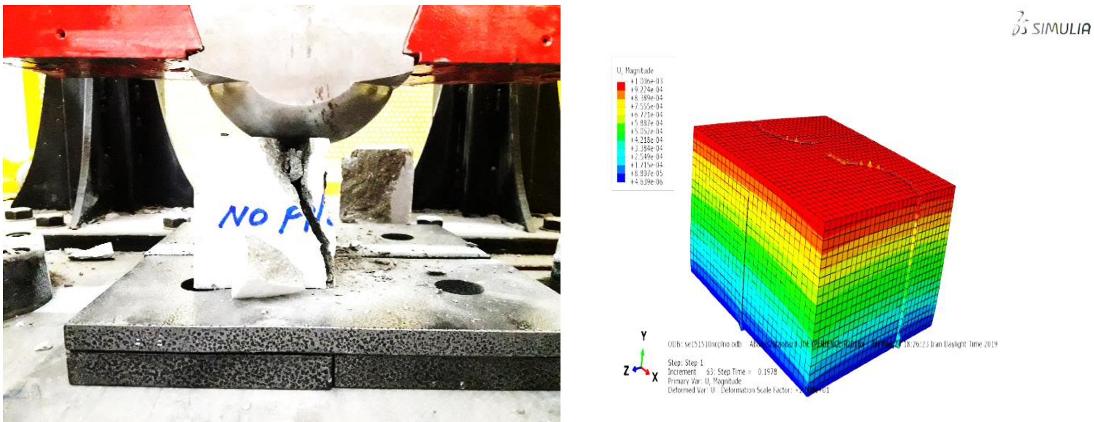
(ب)

شکل ۲۱ (الف) مقایسهٔ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های بدون ورق، (ب) مقایسهٔ نمودار نیرو-جابه‌جایی نمونه‌های مسلح‌شده

در بحث مقایسهٔ تغییر شکل نمونه‌ها در روش تجربی و عددی همان‌طور که در شکل (۲۲) و (۲۳) مشاهده می‌شود، میزان پیشروی ترک‌ها مشابه هم است. در روش تجربی نمونه‌های بدون ورق در هر ۲حالت ٤طرف آزاد و ۲ سرگیردار بر اثر ضربه دچار شکست می‌شوند که همین موضوع در مدل‌سازی عددی هم اتفاق می‌افتد. تغییر شکل نمونه‌های مسلح‌شده و نحوهٔ پیشروی ترک‌ها در روش تجربی هم مشابه روش عددی است، در بین ٤ نمونهٔ آزمایش‌شده، نمونهٔ بتنی مسلح‌شده با ورق ضخامت ۱ میلی‌متر، تغییر شکل و جابه‌جایی کمتری نسبت به ۳ نمونهٔ دیگر داشته است و این موضوع بیانگر اهمیت وجود ورق در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشابه‌بودن نتایج روش تجربی با نتایج عددی نشان از دقت مناسب و نزدیک به‌هم این ۲ روش تحلیل دارد.

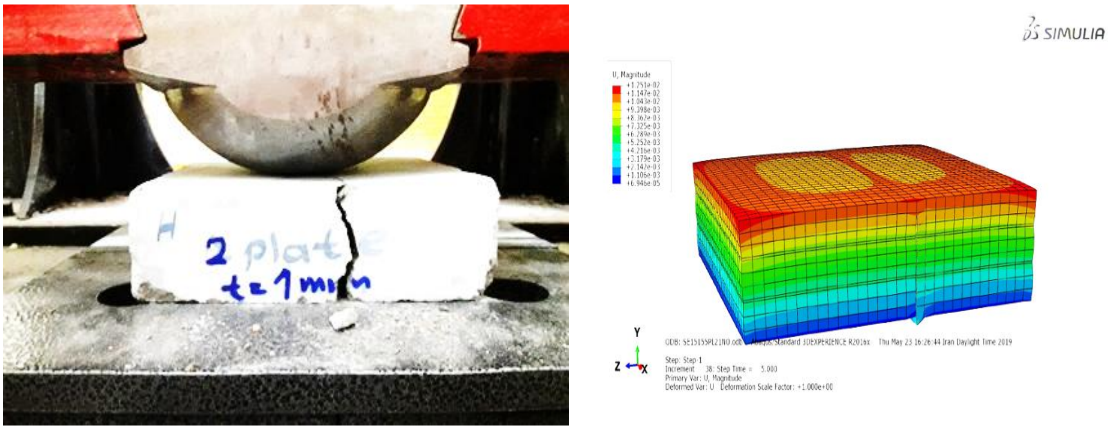


(الف)

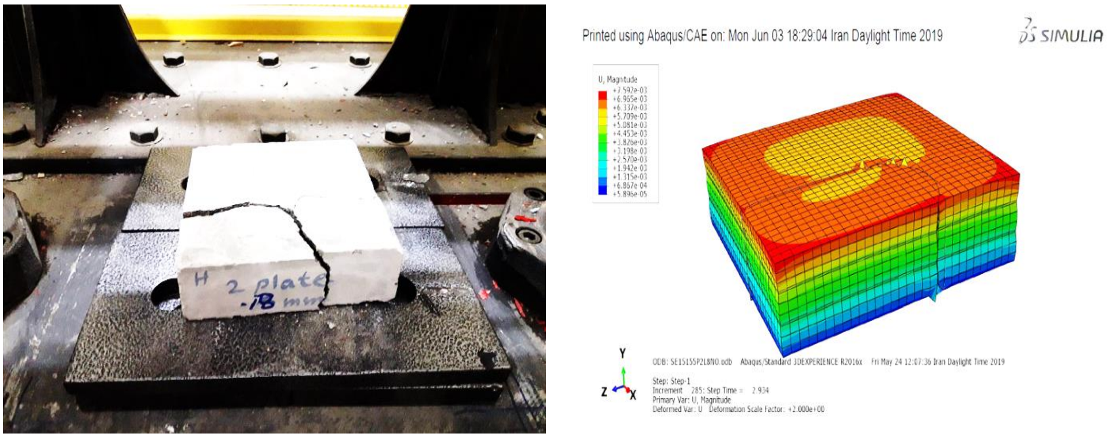


(ب)

شکل ۲۲ (الف) مقایسهٔ روش تجربی و عددی نمونهٔ بدون ورق، ۲سرگیردار، (ب) نمونه بدون ورق، ٤طرف آزاد



(الف)



(ب)

شکل ۲۳ (الف) مقایسهٔ روش تجربی و عددی نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۱میلی‌متر، (ب) نمونهٔ ۲ورق، ضخامت ۰/۸میلی‌متر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی رفتار ۲ نمونهٔ بتنی بدون ورق با ابعاد ۱۰×۱۵×۱۵سانتی‌متر و ۲ نمونهٔ بتنی مسلح‌شده با ابعاد ۵×۱۵×۱۵سانتی‌متر تحت ضربه با سرعت پایین ناشی از سقوط آزاد وزنه انجام شد. براساس نتایج این تحقیق در هر ۲روش تحلیل، شتاب نمونه‌های بدون ورق به‌واسطهٔ ضخامت بیشتر ابعاد نمونه در مقایسه با نمونه‌های مسلح‌شده با ابعاد کوچک‌تر بیشتر بود. هرچه شتاب نمونه‌ها بیشتر باشد، مقدار نیرو هم بیشتر است. تغییر شکل نمونه‌های مسلح‌شده نسبت به نمونه‌های بدون ورق کمتر بود که اهمیت وجود ورق در ساخت نمونه‌ها مشهود است، همچنین ضخامت ورق هم تأثیر بسزایی در تغییر شکل نمونه‌ها دارد، زیرا نمونهٔ ساخته‌شده با ورق ضخیم‌تر، نسبت به نمونهٔ ساخته‌شده با ورق نازک‌تر تغییر شکل و جابه‌جایی کمتری دارد. نمونهٔ ساخته‌شده با ورق ۱ میلی‌متر از شتاب نمونهٔ ساخته‌شده با ورق ۰/۸ میلی‌متر بیشتر است. همچنین مقایسهٔ نمودارهای تحلیل عددی و آزمایشگاهی هر ٤ نمونه، اختلافی کمتر از ۷ درصد را نشان می‌دهد که نشان از دقت مناسب و نزدیک به‌هم روش تجربی با عددی است.

مراجع

۱. طاحونی، شاپور، "طراحی ساختمان های بتن مسل"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم، (۱۳۸۳).

2. Hossain, M. M., Karim, M. R., Hasan, M., Hossain, M. K., Zain, M. F. M., "Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review", *Construction and Building Materials*, Vol. 116. pp. 128–140, (2016).

۳. لطیفی، محمد، "بررسی تحلیل نفوذ پرتابه‌های صلب در یک هدف بتنی پوشش‌دار"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه امام حسین، (۱۳۸۶).

4. Beddar, M, "Development of steel fiber reinforced concrete from antiquity until the present day", Proceedings of the Conference Concrete: Constructions sustainable Option, Vol. 12, Dundee, UK, (2008)

5. Teng, T. L., Chub, Y. A., Chang, F. A., Shen, B. C., Cheng, D. S., "Development and Validation of Numerical Model of Steel Fiber Reinforced Concrete for High Velocity Impact", *Computational Materials Science*, Vol. 42, pp. 90-99, (2008).

6. Zhanga, M. H., Shimb, V. P. W., Lua, G., Chewa, C. W., "Resistance of high-strength concrete to projectile impact", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31, pp. 825– 841, (2005).

7. Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S., Sheu, B. C.,"Assessment of Statistical Variations in Impact Resistance of High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 393-39, (2005).

8. Kalantari, M., Rahim Nami, M., Hasan, K. M., "Optimization of composite sandwich panel against impact using genetic algorithm", *Journal of Optimization*, Vol 21, pp. 123-138, (2009).

۹. رخشانی مهر، مهراله، بخشی، حسین، "بررسی تأثیر مقدار الیاف و رده مقاومت بر مشخصات مکانیکی بتن با الیاف فولادی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه الزهرا، (۱۳۹٤).

۱۰. سزاری، مرتضی، دهقانی اشکذری، قاسم، "بررسی عملکرد ضربه‌ای بتن با مقاومت بالا و بتن فوق‌توانمند الیافی تحت برخورد پرتابه"، دانشگاه صنعتی ملک اشتر تهران، ۱۳۹۵، ص ۳٤۸-۳۳۷، (۱۳۹۵).

۱۱. واحدی، خداداد، "شبیه‌سازی رفتار دینامیکی بتن تحت بارگذاری ضربه‌ای"، بیستمین کنفرانس عمران سازه، دانشگاه تهران، اردیبهشت، (۱۳۸۷).

An Experimental and Numerical Investigation into Concrete Specimens with Expanded Metal Sheet under Impact Loading

Hossein Sepahvand[1] Mojtaba Hosseini[2]
Hossein Hatam[3]

1. Introduction

Nowadays, because of the rapid expansion of the construction industry in Iran and the extensive human and financial losses that can be heard from time to time from the corners of the country due to natural disasters such as earthquakes, boosting accuracy and safety in production and then execution of engineering structures is essential. Concrete is known as one of the most widely used building materials in the world. With the expansion of the use of concrete, properties such as durability, quality, density and optimization get special importance. Self-compacting concrete is very fluid and smooth and a homogeneous mixture that solves many problems of ordinary concrete such as separation, watering, water absorption, permeability, etc. and in addition without the need for any internal vibrator or body vibration, the mold compresses under its own weight.

2. Specimens

The reinforced specimens were made in such a way that two sheets at the top and bottom of the specimen were used during the construction. Also to investigate the effect of sheet thickness one sample was made with 0.8 mm thick sheet and the other sample was made with 1 mm thick sheet. For better bonding and adhesion of concrete and sheet, 4 g of Dezobuild D-10 lubricant is used per kg of cement. Samples were placed in water for 28 days after fabrication for fabrication. Figure 1 shows the construction and concreting steps.

3. Drop Hammer Test Machine 7500 J

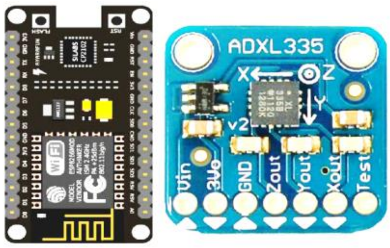
The device used for impact testing is DH-TM-7500J. The maximum adjustable height of this device is 3 meters and the impact mass can be adjusted from 180 to 250 kg. The height of the fall in this study was considered to be 25 cm. The impact mass of four concrete samples in this study was 180 kg. The impact tester consisted of several parts: the central control unit of the device, the system for measuring and recording information (accelerometer with accurate measurement of microseconds and used as WiFi), engine impact support bases, impact weights (180-250 kg) and impact head in different shapes (flat, conical, hemispherical). This device is made in Iran and belongs to Lorestan University. Figure 2 shows a view of this device and accelerometer sensor.



Figure 1. Stages of construction and concreting of samples



(a)



(b)

Figure 2. a) Impact testing device, b) Accelerometer sensor

[1] MSc, Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
[2] Associated Professor, Civil Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.
[3] Corresponding author: Associated Professor, Mechanical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran. **Email**: hatami.h@lu.ac.ir

4. Experimental Method

In the experimental method, sheetless samples have more acceleration than reinforced samples. Moreover, samples reinforced with sheets have less displacement than samples without sheets, which clearly shows the effect of the presence of sheets on the fabrication of samples. On the other hand, samples reinforced with sheets of 1 mm thick due to greater thickness compared to the sample reinforced with 0.8 mm thick sheet, have less displacement, which indicates that with increasing the thickness of the sheet, the displacement of the sample decreases after the impact.

5. Numerical Modeling

In order to numerically investigate the behavior of concrete samples under impact due to free fall and compare it with laboratory data, finite element modeling was performed using Abacus software for all four samples. For modeling concrete, the properties of self-compacting concrete and modeling of mesh sheet are considered as the characteristics of st37 steel. Acceleration-time and force-displacement diagrams of the samples are extracted by applying the reference point in the striking ball, which can be seen as a black line in Figure 3.

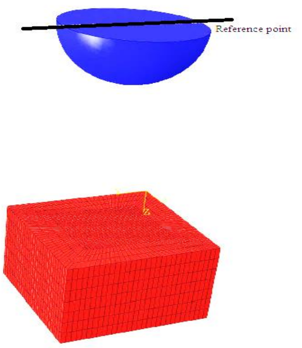


Figure 3. Sphere and sample modeling

In the numerical method, it is observed that, like the experimental method, the acceleration of sheetless samples is higher than that of reinforced samples. Moreover, the acceleration in the sheetless specimen under the conditions of double-trapped support is more than the acceleration of the sheetless specimen in the quadrilateral position. The acceleration of a sample reinforced with a 1 mm thick sheet is higher than that of a sample reinforced with a 0.8 mm thick sheet, which indicates that a thicker sheet increases the acceleration.

6. Results and Discussion

Comparing the acceleration-time and force-displacement diagrams of the specimens, it can be seen that the experimental values are higher than the numerical values and this difference is less than 7%, This value is due to reasons such as friction between the impactor bearings, the weight-bearing rods, as well as the presence of damping, which is not applied in the numerical model. However, it should be borne in mind that the support conditions and possible errors in the construction of samples are important factors affecting results.

7. Conclusion

In this research, laboratory study and numerical simulation of the behavior of two concrete samples without sheets with dimensions of 15×15×10 cm and two reinforced concrete samples with dimensions of 15×15×5cm under low-speed impact due to free fall of weight were performed. Based on the results of this study, in both methods of analysis, the acceleration of sheetless specimens was higher due to the greater thickness of the specimen compared to the reinforced specimens with smaller dimensions. The higher the acceleration of the samples, the greater the amount of force. The deformation of the reinforced specimens was less than that of the specimens without sheets, which shows the importance of sheets in the fabrication of specimens. Moreover, the thickness of the sheet has a significant effect on the deformation of the samples as the sample made with a thicker sheet has less deformation and displacement than the sample made with a thinner sheet. The acceleration of the sample made with 1 mm sheet is higher than the acceleration of the sample made with 0.8 mm sheet. Also, the comparison of the graphs obtained from numerical and laboratory analysis of all four samples also shows a difference of less than 7%, It shows the appropriate accuracy and close to the experimental method with the numerical method.